

兵庫県北部照来地区における地すべり地帯の粘土鉱物

田崎和江*・北山茂樹**・永美 章***・楊普才****

Clay Mineralogy on Landslides in Teragi area, Northern Hyōgo, Japan
Kazue Tazaki, Shigeki Kitayama, Akira Nagami, and Yang Pu Cai

Abstract

Swelling clay minerals carry important rule to clarify the contribution of clays on landslide. The clay fractions ($<2\mu\text{m}$) were separated from boring-cores at the landslide areas of northern Hyōgo. Smectite content was drastically changed near the slip surface in the tuffaceous bedrock, where permeability coefficient was also changed. Microscopical observation of oriented thinsection revealed that mica mineral grains were parallel to the slip surface. By using SEM and TEM, a large amount of flaky smectite was clearly showed on the surface, indicating low permeability. The orientation of smectite particles on shear surface showing slickensides or low effective normal stresses, was observed.

1. ま え が き

兵庫県美方郡温泉町照来地区は、山陰地方の最も大きな地すべり地帯の一つである。明治時代から大正時代にかけて、大きな地すべりが多発し、最大の水平変化量は60mにも達した。現在でも、道路の亀裂や隆起、側溝壁の破壊、建造物の変状、変形があちこちで認められ、その地盤の特徴の解明と地すべり防止対策が、土質工学的な立場から急がれている。本論文では、当地域のボーリング試料について、X線粉末回折、土壌薄片観察、電子顕微鏡観察を行い、主な粘土鉱物と地すべり層との関連を明らかにした。

地すべりに粘土鉱物が大きく影響を与えていることは、多くの研究者によって指摘されてきた(谷津, 1965; 藤本, 1967; 高谷, 1977; 矢島, 1979; 江頭・宜保, 1983; 守隨, 1984; Egashira, 1986; 守隨・下田, 1987)。特に、モンモリロナイトは、地すべりに対して大きな影響を与えと言われてきた。また、新第三系のグリーンタフには、モンモリロナイトが多量に含まれ、地すべりが発生しやすいことが知られてい

る。しかし、従来は、いわゆる“地すべり粘土”の鉱物分析の域を脱しないものが多く、本研究では、ボーリング試料の定方位土壌薄片を作製し、鉱物の配列状態を観察した他、X線粉末回折、走査型・透過型電子顕微鏡による鉱物組成とその形態、分布の検討を行った。その結果、スメクタイト含有量とその深度における透水係数に相関性があり、両者が大きく変化する、すべり面とすべり面の上下の地層につき、マクロとミクロの両面から検討した。

2. 試料および実験方法

分析試料は、兵庫県温泉町が発注し、日本基礎技術KKが1989年および1990年に行ったボーリングのうち、第1図にしめした3ヶ所(TBR6, TBR7, M2)から得られたコアの一部を使用した。このうちTBR6とTBR7は、過去に地すべりが発生した地点であり、M2は、1989年に地すべりを起こした地点である。ボーリングコアの透水係数や貫入試験などの結果から、TBR6は、26.6~28.1m付近に、TBR7は、11.5~11.8m付近に、M2は、10.5m付近に各々、すべり面があると推定されている(日本基礎技術、未発表)。これらは、ほぼ北西方向に、2~5度の比較的ゆるい傾斜で滑ったと考えられている。

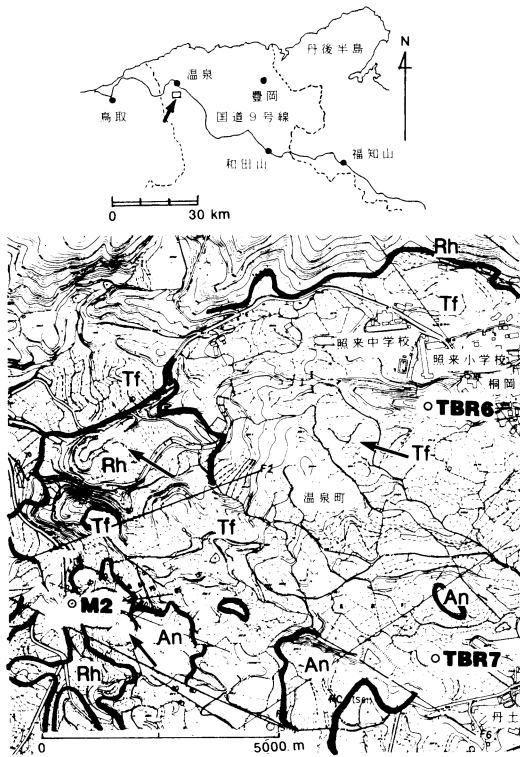
兵庫県北西部から鳥取県東部にかけて分布する新第三紀中新世後期~鮮新世前期の陸成層は、弘原海・松

* 島根大学理学部地質学教室 Department of Geology, Shimane University, Matsue, Shimane, 690 Japan

** 宝塚市役所 (1990年3月島根大学を卒業)

*** 日本基礎技術株式会社

**** 広島大学理学部大学院 (1990年3月島根大学修士コース終了)



第1図 兵庫県北部照来地区における地すべりブロックとボーリング地点.

TBR6, TBR7 は過去に地すべりを起こした地点. M2 は1989年に地すべりを起こした地点. —:断層, ←:地すべりの方向, An:安山岩質熔岩及び凝灰角礫岩(寺田安山岩層), Tf:凝灰岩, 泥岩及び砂岩(春來泥岩層), Rh:流紋岩質熔岩凝灰岩及び凝灰角礫岩(歌長流紋岩層), 以上, 照来層群.

本(1958)によって照来層群と命名された. その後, 松原・坂本・上村(1966)によって, 照来層群は, 下位から基底礫岩層・歌長流紋岩層・湯谷礫岩層・春來泥岩層・茅野凝灰質砂岩礫岩層・寺田火山岩類に細分されている. 当地区は, 照来層群のうち, 歌長流紋岩層・湯谷礫岩層・春來泥岩層・寺田火山岩類からなる(Furuyama, 1989). 春來泥岩層は, 湯谷礫岩層を整合に覆っている流紋岩質凝灰岩とシルト岩の互層であり, 地すべりはこの春來泥岩層で発生している. この地区の地すべりブロックを第1図に太線で示した.

分析に用いた試料は, ボーリング地点(TBR6,

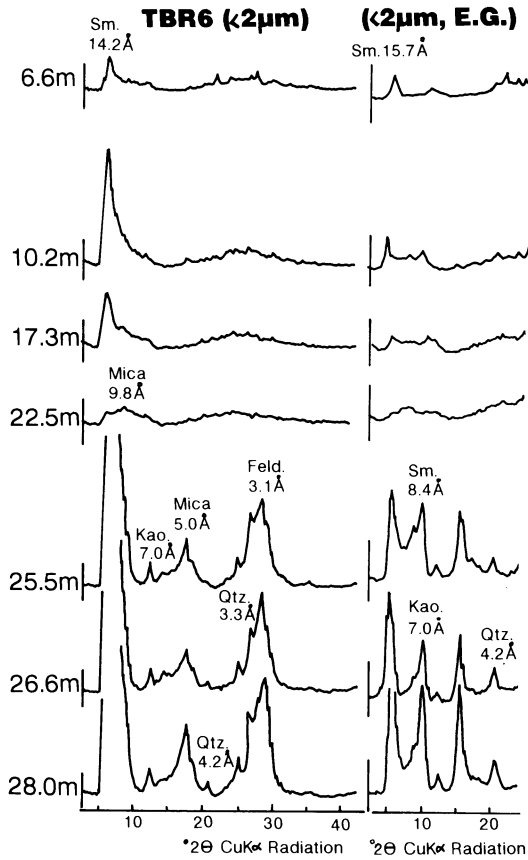
TBR7, M2)の推定地すべり面の上下を含む16試料と, 地すべりを起こしていない春來泥岩層である. 岩石試料の定方位薄片は, 風乾後, シアノボンドとベトロポキシで凝固させた上, 粘土が分散しないように, 灯油を使用して研磨した. 走査型電子顕微鏡試料は, ボーリング方向に垂直な試料を用い, 風乾後, 両面テープで試料台に固定させ, 金蒸着を行い, 加速電圧15 kVで観察した. X線粉末回折分析は, 全岩試料と $2\mu\text{m}$ 以下の粘土分との両方について行った. 定方位試料は, 無処理の試料の分析を行った後, エチレングリコール処理, 加熱処理(110° , 300° , 400° , 500° , 600°C)を各々行い, 粘土鉱物の同定を行った. 測定条件は, 電圧30 kV, 電流15 mAである. $2\mu\text{m}$ 以下の懸濁液の一部を透過型電子顕微鏡試料に用い, 加速電圧160 kVで観察した. 走査型電子顕微鏡は日本電子KK製 JEOL JSM-T220Aを, 透過型電子顕微鏡は, 日本電子KK製 JEOL-JEM 2000EXを使用した.

3. 実験結果

X線粉末回折

TBR6, TBR7, M2地点におけるボーリングコアのうち, 16試料の全岩および粘土分($<2\mu\text{m}$)の鉱物組成は, 石英, 長石類, スメクタイト, カオリン鉱物, 雲母鉱物である. $2\mu\text{m}$ 以下の粘土分の定方位試料のX線粉末回折結果の一部(TBR6)を第2図および3図に示した. TBR6地点の粘土鉱物は, 主に 14.2Å のスメクタイトであり, 少量のカオリン鉱物(7.0Å)と雲母類鉱物(10Å , 5Å)をとまなっている. 14.2Å のピークは, エチレングリコール処理により, 15.7Å に移動し, $300^\circ\sim 400^\circ\text{C}$ の加熱で $9.8\sim 10\text{Å}$ に移動し, $500^\circ\sim 600^\circ\text{C}$ の加熱で, 完全に 10Å に移動した. 一方, 7Å のピークは, 500°C の加熱で消失したので, カオリン鉱物と同定した. TBR6の 25.5m と 26.6m における加熱処理の結果をみると, $500^\circ\sim 600^\circ\text{C}$ の加熱で 10Å のピークが強くなる場合(前者)と弱くなる場合(後者)がある.

無処理試料のX線粉末回折による各々の鉱物, 粘土鉱物の反射強度(CPS)を第4図にプロットした. また, 3m 毎の透水係数(cm/sec)を深さ方向にプロットし, 鉱物の含有量を比較すると, スメクタイトの含有量の変化と透水係数の変化とは対応している. TBR6およびTBR7とも, 透水係数が急激に減少する深さ付近で, スメクタイト含有量が急激に多くなる. 両者が急激な変化を示す深度における岩相は, 風化の著し



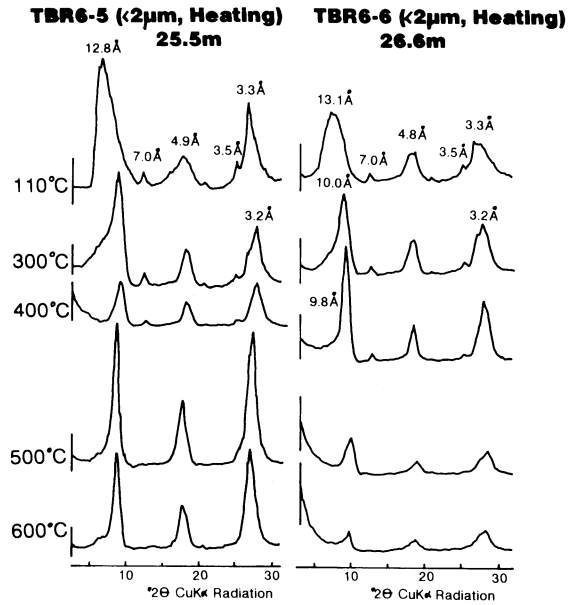
第2図 TBR6 地点における粘土分 (<2μm) のX線粉末回折。

Sm:スメクタイト, Mica:雲母類粘土鉱物, Kao:カオリン鉱物, Feld:長石類, Qtz:石英, E. G.:エチレンジグリコール処理をした分。

い泥質凝灰岩(第4図中のt)であり,貫入試験などで推定された地すべり面と一致する。M2地点の透水係数のデータはないが,11.0mでスメクタイト含有量が急激に減少する。この深さの岩相は,凝灰質泥岩であり,鏡肌も観察されることから,地すべり面と推定される。

薄片観察

M2地点における風化の著しい凝灰質泥岩(A)と凝灰角礫岩(B)(8~11m)の薄片は,地すべりによる構造をあらわしている。前者(A)は,亀裂がよく発達しており,太い亀裂は地すべり面に対してほぼ垂直に,細い無数の亀裂は,平行である。寺田火山岩類のものと同



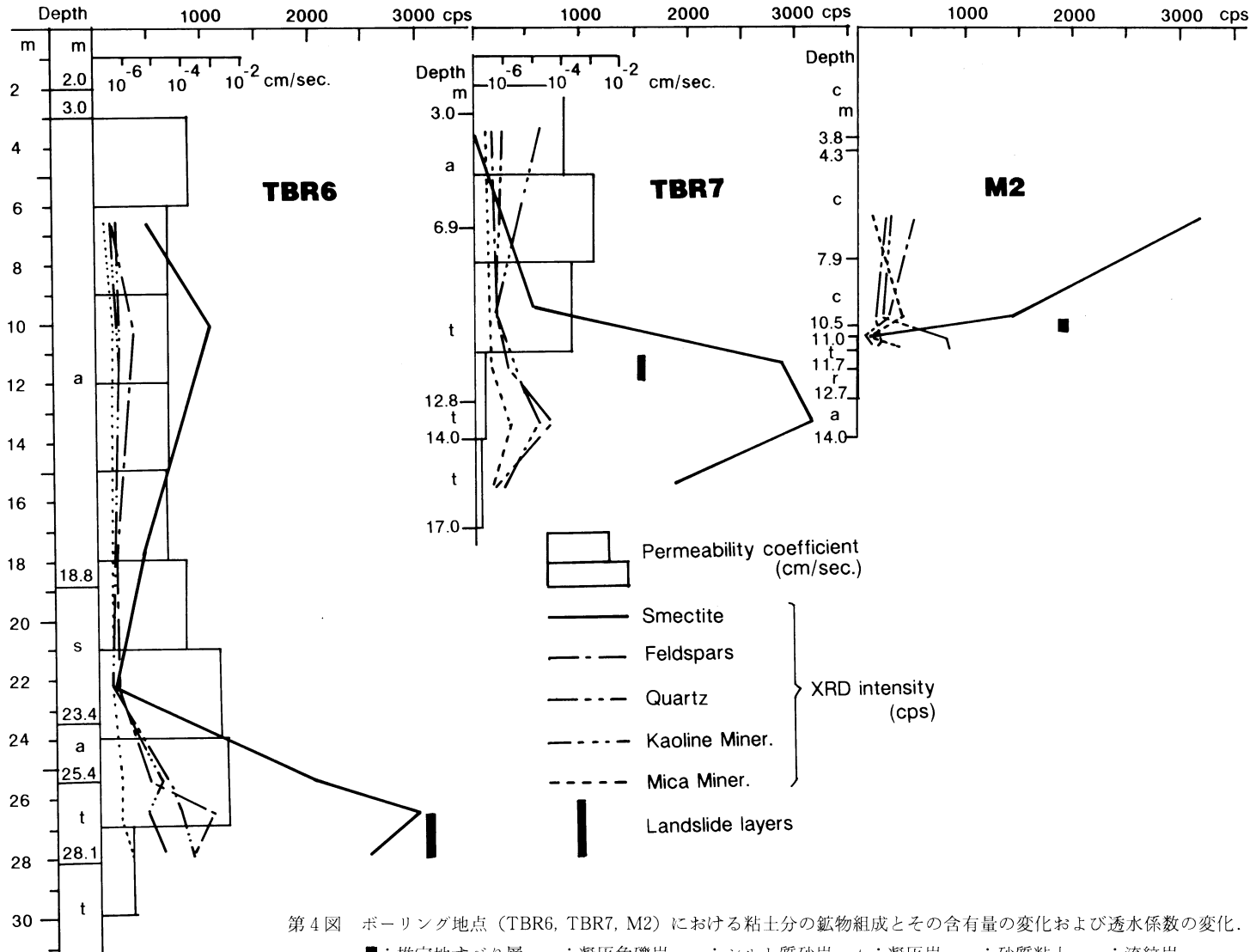
第3図 TBR6-5 (25.5m) と TBR6-6 (26.6m) のボーリングコア試料における粘土分 (<2μm) の加熱処理後のX線粉末回折。

えられる安山岩の岩片礫もみられ,亀裂の周囲は,粘土化している。後者(B)は,歌長流紋岩と考えられる岩片礫が多くみられ,鉱物粒子は大きい。また,鉱物,特に黒雲母の配列に方向性があり,地すべり面と平行しているのが特徴である(第5図B,矢印)。春來泥岩でみられるようなガラス質の互層はみられない。

TBR6 および TBR7 地点における試料の薄片観察によれば,風化が著しく,強く粘土化している26~28m付近および12~14m付近の試料には,細かい亀裂と粘土脈が認められる。それより上部においては,寺田火山岩類と思われる安山岩礫が多くみられ,基質は,細かい鉱物粒子でうめられている。この安山岩には填間状の石基と自形の大きな斜長石・角閃石・両輝石の斑晶が観察される。TBR7地点の試料中には,歌長流紋岩と考えられる球顆構造を持った岩片が多く,しばしば亀裂が多く入った縞模様も認められる。

走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察

TBR6地点における地すべり面の上層22.5m(A)と地すべり面の26.6m(B)のSEM写真を第6図に示す。Aには,フレーク状のスメクタイトが殆ど認められないが,Bでは,フレーク状のスメクタイトが急増し,層状に重なっている。同様に,TBR7地点において



第4図 ボーリング地点 (TBR6, TBR7, M2) における粘土分の鉱物組成とその含有量の変化および透水係数の変化。

■: 推定地すべり層, a: 凝灰角礫岩, s: シルト質砂岩, t: 凝灰岩, c: 砂質粘土, r: 流紋岩。

も、地すべり面の上層9.5m(C)ではスメクタイトは認められないが、地すべり面の12~15m(D)にかけて、フレック状のスメクタイトが非常に多くなる。なお、地すべりを起こしていない地点から採集した春來泥岩層には、スメクタイトは殆ど認められない。地すべり面と思われる凝灰岩層中のフレック状スメクタイトは、長石類や石英などの粒子間隙をうめるように発達し、保水性の良さを示唆している。また、これらの試料は、すべてボーリングコアの垂直断面を観察しているので、スメクタイトのフレックが重なり合う方向は、薄片で観察された黒雲母などの鉱物の配列方向とよく一致している。しかし、M2地点の8m付近の試料は、フレック状のスメクタイトが多くみられるにもかかわらず、特徴的な並び方は認められない(第7図A, B)。

透過型電子顕微鏡(TEM)観察

薄片やSEMによる観察ではわからない粘土粒子をTEMで観察した。TBR6(22.5m)における黒雲母は、その冊子構造を保ちながら、殆どの部分が、フレック状のスメクタイトに変化していることが明らかになった(第8図A)。さらに、フレック状のスメクタイトの他、長管状のハロイサイトも多く認められ、保水性を増進させている(第8図B)。TBR7地点における深さ9.5mの試料は、SEM写真(第6図C)では、フレック状物質は認められないが、TEM写真では、少量の薄膜の他微細な粒子が多量に存在することを示した(第8図C)。しばしば200 μm 程度の六角板状のカオリナイトも認められる(矢印)。この微細粒子の高分解能写真は、この粒子が3.9 \AA の格子像を持つことを明らかにした(第9図A)。この試料のX線粉末回折は、9.0, 3.9, 2.9 \AA の回折線を示すことからパイロフィライトと同定したが、第9図Aに見られる3.9 \AA の格子像はパイロフィライトの(02 $\bar{1}$)反射と考えられる。左すみには、少量のフレックが認められる。またTBR7地点における深さ13.35mの試料は、Aとまったく異なる形態を示す。この試料のX線粉末回折は、14.9, 10.0, 7.0 \AA 鉱物の存在を示したが、高分解能電子顕微鏡は、脱水したスメクタイトの10 \AA の格子像を示している(第9図B)。さらに混合層鉱物と考えられる面間隔が、中央上方に見られる。第9図のAとBは、地すべり面をはさんだ上方と下方にあたるが、両者の粒子形態の差異は保水性の違いを、結晶構造の差異は、配向性と安定性の違いを示唆していると考えられる。

4. 考 察

照来地区内の地すべり地から得たボーリングコアの観察と分析結果は、マクロおよびマイクロの両面から、スメクタイトの高含有量が地すべり面(層)に密接に関連していることを示した。1989年に地すべりを起こしたM2地点では、9.8~10.5m付近に鏡肌や方向性を持った細かい亀裂が多く認められ、スメクタイトの含有量が急激に減少しているTBR6, TBR7とは状況が異なっている。ここでは、すべり面は砂質粘土層と紋紋岩にはさまれた凝灰質泥岩(春來泥岩)の薄層に生じている。地すべりを起こしていない春來泥岩層のX線粉末回折パターンは、スメクタイト、雲母鉱物とも回折線強度は弱い。地すべりを起こす春來泥岩層は透水性の高い凝灰角礫岩層の下にある凝灰岩ないし凝灰質泥岩が地下水などの影響で強く風化され、スメクタイト生成が促進された地域と考えられる。地すべり地帯の風化条件として、地下水の影響をあげている文献も多い(守隋・下田, 1987; 須藤談話会, 1974; 藤田, 1990)。

過去に地すべりを起こしたTBR6とTBR7地点では、透水係数が低くなる深さとスメクタイト含有量が高くなる深さとよく一致することから、地すべり面と不透水層形成が強く関連を持っている。地すべりを起こした当時の滑り面は狭く、その後、水の影響で比較的厚い風化層が形成され、地すべりが発生したと考えられる。

また、地層に水が影響すると構成鉱物、特に粘土鉱物は含水量を増すのみならず、配向性がよくなり、一方向に再配列し、さらに滑りやすい不安定な状態となるであろう。すべり層の水分が増大すれば、すべり層を構成する粒子(スメクタイト)間の摩擦、粘着力、剪断抵抗が低下し、この地層は滑動しやすくなる(Paeth *et al.*, 1991; 藤田, 1990)。

第三紀層の凝灰岩に由来する地すべり粘土は、兵庫県に限らず、結晶片岩地域を除くほとんどの地域においてスメクタイトが主成分である(谷津, 1965; 江頭・宣保, 1983; 守隋・下田, 1987)。当研究地域においても、安山岩層は風化してもスメクタイトが形成されず、泥岩および酸性凝灰岩は風化することにより、スメクタイトが形成される。地すべりにおけるすべり面の形成に粘土、特にスメクタイトが寄与することは、第三紀層地すべりでは確からしい。そしてスメクタイト含量が高いほど、すべり面形成に対する粘土の寄与

が大きいと考えられる。粘土鉱物の中でもスメクタイトが最も大きい界面化学的活性をもつからであると、江頭・宣保(1983)は述べている。本研究においても、すべり面とその上層とでは、スメクタイトの含有量が急激に変化した上、透水係数の急激な変化とも一致した。さらにスメクタイト化した黒雲母がすべり面または層理面に対して平行に配列している上、マトリックスのフレーク状スメクタイトも層状に重なっていることが明らかになった。さらに管状ハロイサイトもこのスメクタイトと混合していた。これらの顕微鏡観察結果は、地すべり地帯における、構成粘土鉱物の種類と含有量、透水係数と含水量の他、構成鉱物の配向性も、地すべりに関与することを示唆している。特に、黒雲母が風化し、スメクタイト化すると、冊子構造中に水分が入り、保持されてマイクロレベルのすべり層を形成し、この地層全体も滑動しやすくなるであろう。過去に地すべりを起こした TBR 6, TBR 7 と、最近地すべりを起こした M2 とでは、地すべりの要因が多少異なっているように見えるが、今後の詳しい検討が必要である。

5. ま と め

照来地区地すべり地帯における TBR6, TBR7, M2 の三地点のボーリング試料のうち、推定地すべり面を含む 16 コアの鉱物、粘土鉱物を調べた。定方位薄片観察, X線粉末回折, 電子顕微鏡観察により、次のことが明らかになった。

1. 地すべり面と考えられる凝灰岩層には、鏡肌その他、すべり面に平行に細かい亀裂が存在し、黒雲母もすべり面または層理面に対し平行に配列しているのが観察された。
2. スメクタイトの含有量が高いところでは、透水係数が低い。
3. TBR6 と TBR7 においてスメクタイト含有量が急激に増加するところは、貫入試験など他の計測器ですべり層と推定された所と一致した。
4. すべり面において、フレーク状スメクタイトが顕著であり、しばしば、層状に重なっている。また、黒雲母は風化して、スメクタイトに変化している。管状ハロイサイトもスメクタイトと混在している。
5. 照来地区における第三紀凝灰岩層にみられる地すべりに、スメクタイトの含有量、透水係数、構成鉱物の配向性が深く関与している。

謝 辞

温泉町農村整備課には、ボーリング試料を提供していただいた。九州大学農学部の大坪政美博士には、地すべりに関する文献やご助言をいただいた。ここに厚くお礼申し上げる。この研究の一部に、文部省科学研究費補助金(一般 A, 01430010)をあてた。

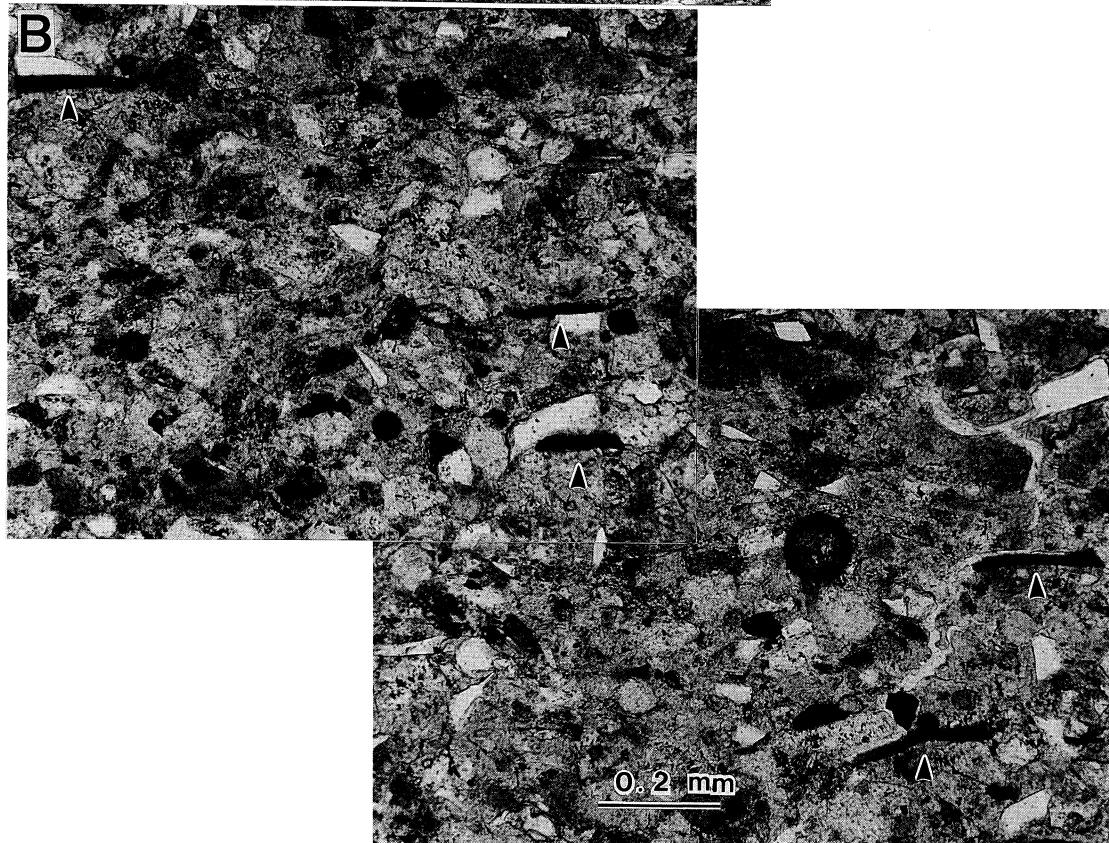
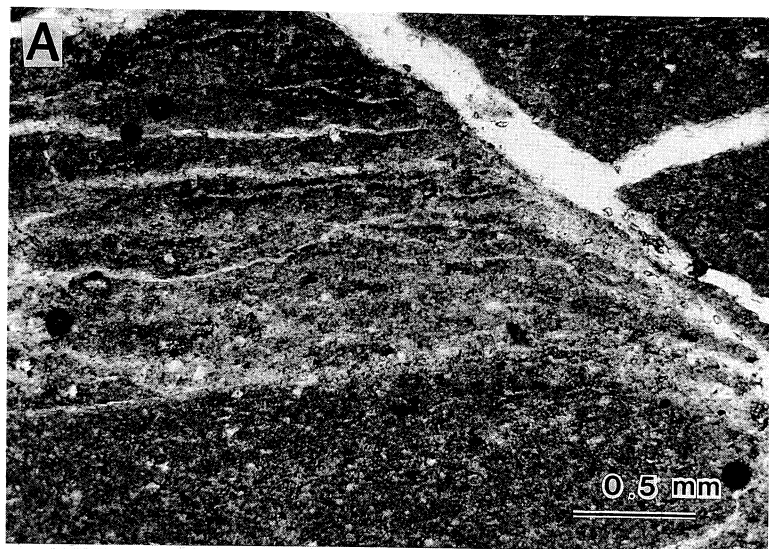
文 献

- 江頭和彦・宣保清一, 1983: 沖縄, 島尻層群の地すべりに及ぼす粘土の寄与. 地すべり, 19, 1-7.
- Egashira, K., 1986: Clay Mineralogical Bedrock and Colluvial-soil Slides in the Northern part of Nagasaki. *Clay Science*, 6, 218-223.
- 藤本 広, 1967: 西日本における地すべり層土の粘土鉱物について(第1報). 地すべり, 3, 14-20.
- Fukuyama, K., 1989: Geology of the Teragi Group, Southwest Japan. *Journal of Geosciences*, Osaka City University, 32, 123-173.
- 藤田 崇, 1990: 地すべり. 山地災害の地質学, 共立出版.
- 松原秀樹・坂本 亨・上村不二雄, 1966: 兵庫県北西部の地質. 地質調査所月報, 17, 65-74.
- Paeth, R. C., Harward, M. E., Knox, E. G. and Dyrness, C. T., 1971: Factors affecting mass movement of four soils in the Western Cascades of Oregon. *Soil science Society of America Proceedings*, 35, 943-947.
- 須藤談話会編, 1974: 土を見つめる. 三共出版.
- 守隋治雄, 1984: 地すべり地におけるスメクタイトと斜プロチル沸石の関係について. 地すべり, 21, 17-23.
- 守隋治雄・下田 右, 1987: 富山県国見地区の地すべり粘土中の粘土鉱物について. 粘土科学, 27, 211-220.
- 高谷精二, 1977: 愛媛県における地すべり地の粘土鉱物(1). 応用地質, 18, 19-28.
- 弘原海清・松本 隆, 1958: 北但馬地域の新生界層序. 地質学雑誌, 64, 625-637.
- 矢嶋澄策, 1979: 地すべりと粘土鉱物について. 粘土科学, 19, 91-96.
- 谷津栄寿, 1965: 日本の地すべり粘土について. 粘土科学, 4, 54-66.

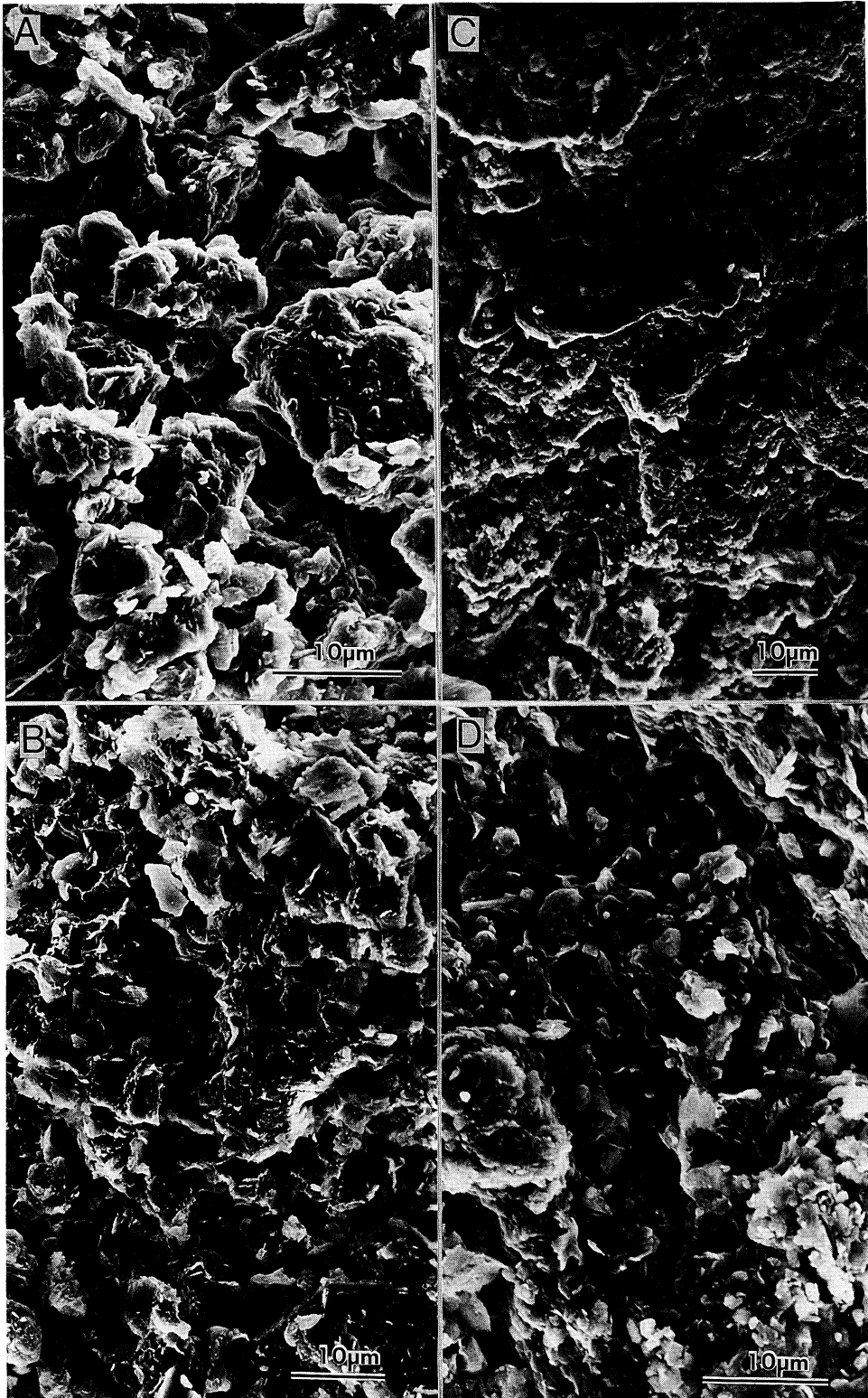
図 版 説 明

- 第5図 ボーリング地点 M2 における定方位薄片写真。
A：8.1mの砂質粘土（細かい亀裂が地すべり面に平行に入っている）、B：歌長流紋岩片礫（黒雲母が地すべり面に平行に配列している）（矢印）。
- 第6図 TBR6 と TBR7 における地すべり面とその上層の走査型電子顕微鏡写真。
A：TBR6, 22.5m 地すべり面上層（フレーク状スメクタイトは見られない）、
B：TBR6, 26.6m 地すべり面（フレーク状スメクタイトが多い）、C：TBR7, 9.5m（フレーク状スメクタイトは見られない）、D：TBR7, 15.5m（フレーク状スメクタイトが多い）。
- 第7図 M2 地点における深さ8.1m(A)と8.35m(B)の走査型電子顕微鏡写真。フレーク状スメクタイトが顕著である。
- 第8図 TBR6 とTBR7 地点における粘土分の透過型電子顕微鏡写真。
A：TBR6, 22.5m, スメクタイト化した黒雲母、B：TBR6, 22.5m, 管状ハロイサイト、C：TBR7, 9.5m, 細粒の鉱物粒子と六角板状のカオリナイト（矢印）。
- 第9図 TBR7 地点における地すべり層(B)とその上部層(A)の粘土分の透過型電子顕微鏡写真。
A：TBR7, 9.5m の微細な鉱物粒子。3.9Åのパイロフィライトの格子像が見られる。
B：TBR7, 13.35mのフレーク状スメクタイト。10Åの格子像は、スメクタイトの脱水した面間隔。右上方には、混合層鉱物と思われる格子像が見られる。

〈第5図〉

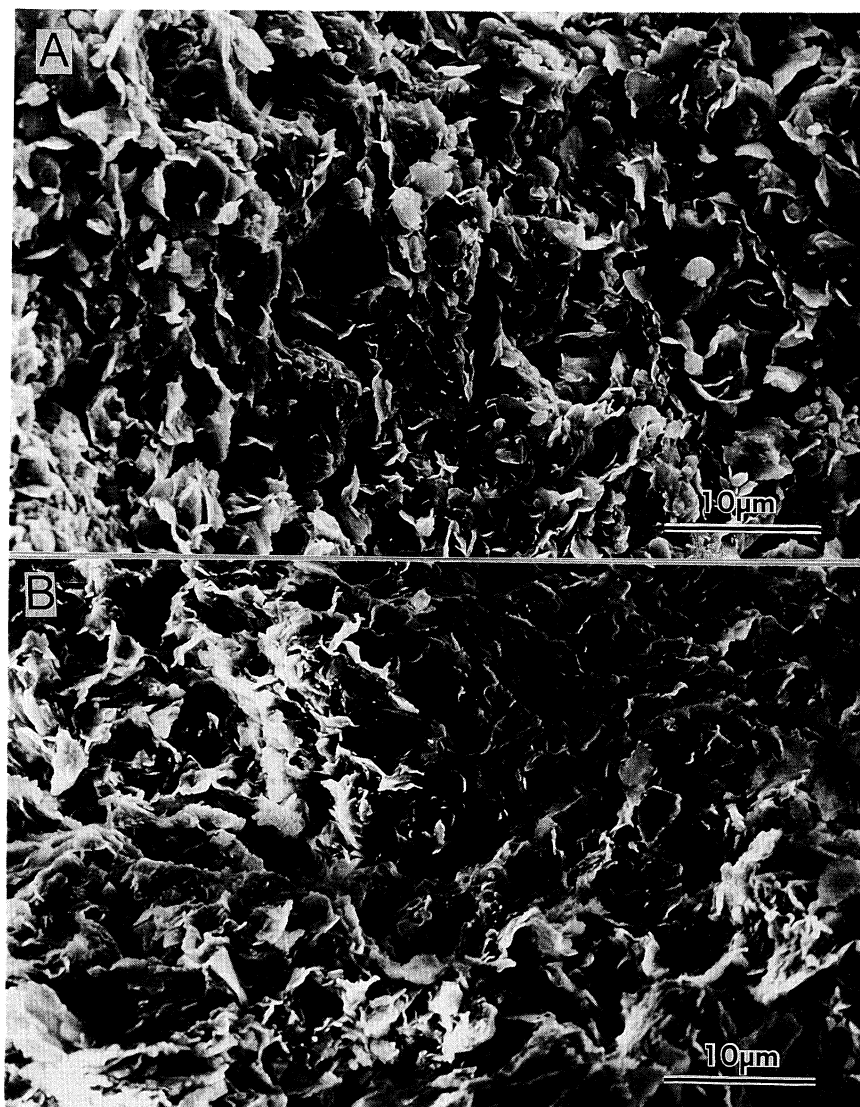


〈第6図〉

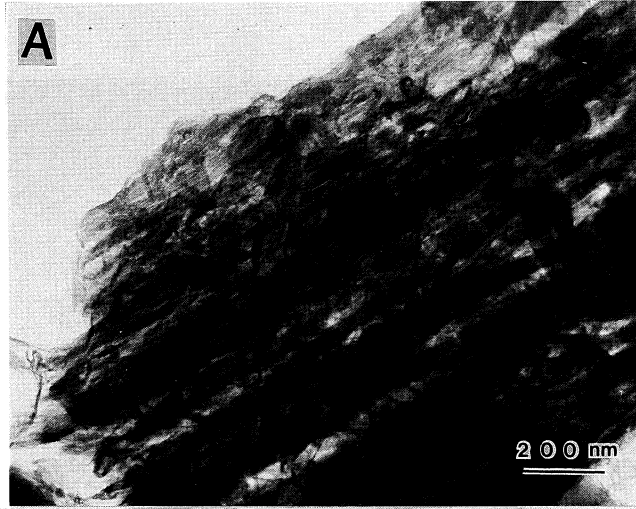


兵庫県北部照来地区における地すべり地帯の粘土鉱物

〈第7図〉



〈第 8 図〉



〈第9図〉

